

# Can손실이 고려된 등가회로도를 이용한 SMART용 Canned-motor 설계 및 해석에 관한 연구

論 文  
50B-10-1

## A Study on the Design and the Analysis of Canned-motor for SMART(System integrated Modular Advanced Reactor) using the Equivalent Circuit with Consideration of the Can-loss

具大鉉\* · 姜道鉉\*\* · 朴正雨\*\*\* · 金鍾仁§ · 朴鎮錫§§ · 曹允鉉§§§ · 鄭郡錫#

(Dae-Hyun Koo · Do-Hyun Kang · Jung-Woo Park · Jin-Seok Park · Jong-In Kim · Yun-Hyun Cho · Gun-Seok Jung)

**Abstract** - The 3-phase induction is used for the MCP(main coolant pump) and the pure water is used for lubrication of bearing because of the difficulty of repair. Therefore the type of motor is the canned-motor that is welded by sealed can to prevent the stator and the rotor from the lubricating water. A lot of Eddy currents are produced in the can because of the conductivity of material. And these eddy currents in the can are the most important cause that decrease the efficiency of induction motor. Therefore we have to find the method to decrease these eddy currents in the can for the improvement of efficiency of motor. In this paper, we proposed the method of design and analysis of canned-motor using equivalent circuit with consideration of can loss for the improvement of efficiency of motor.

**Key Words** : Canned-motor, Induction motor, Can, Can loss, Design, Analysis, Pump

### 1. 서 론

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)용 냉각재 순환펌프는 원자로의 위치제한으로 인하여 그림 1과 같이 수직으로 제작 및 설치가 된다. 냉각재 순환펌프용 전동기는 유도전동기이며 원자로 특성상 한번 설치가 되면 유지 보수가 어렵기 때문에 순수한 물을 베어링 윤활로 사용한다. 이로 인하여 전동기 공극 사이로 베어링 윤활용 물이 흐르게 되며 이 물로부터 고정자와 회전자를 보호하기 위하여 고정자와 회전자에 얇은 캔(Can)을 씌운다. 공극으로 흐르는 물은 독립냉각수로 공극에서 고정자 철심 외곽 쪽으로 흘러 들어가 외부 냉각수와 열 교환이 이루어진 다음 다시 베어링과 공극 쪽으로 순환을 한다. 전동기의 공극에는 약 14.7 [MPa]의 높은 압력이 존재하기 때문에 전동기 보호용으로 사용된 캔의 재질은 압력에 견딜 수 있도록 강성이 좋고, 용접성이 좋은 재질이어야 하며 또한 전동기의 효율 특성을 고려하여 비자성 재질이어야 한다. 이러한 특성들을 만족하는 재질은 대체로 도전체이기 때문에 유도전동기 특성상 캔에서 발생한 와전류로 인하여 많은 열이 발생하게 되어 전동기 효율 특성을 저감시키는 주된 요인이 된다. 이러한 캔에서 발생하는 열과 손실은 캔형 전동기(Canned-motor)를 설계하는데 있어 가장 중요한 부분

으로 전동기의 효율을 올리기 위하여 최대한 캔에서 발생하는 와전류를 최소화 할 수 있는 설계방법을 찾아야 한다. 하지만 기존 산업용 전동기에는 이러한 캔이 존재하지 않기 때문에 캔형 전동기 설계에 대한 자료가 극히 빈약한 실정이며 또한 캔에서 발생하는 와전류를 정확하게 해석하는 것은 대단히 어려운 일이다. 그러므로 본 논문에서는 캔형 전동기 설계 및 해석시 캔손실이 고려된 등가회로도를 이용한 방법으로 이러한 캔의 손실을 최소화 할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

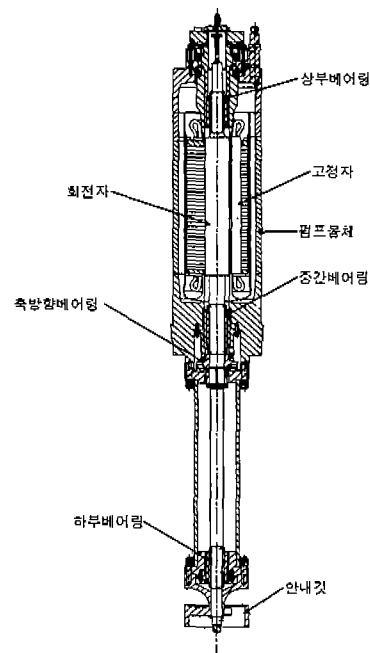


그림 1 SMART용 캔형 전동기 펌프  
Fig. 1 Canned-motor pump for SMART

\* 正會員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics研究Group 前任研究員  
\*\* 正會員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics研究Group 長  
\*\*\* 正會員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics研究Group 前任研究員  
§ 正會員 : 韓國原子力研究所 動力爐開發Team 室長  
§§ 正會員 : 韓國原子力研究所 動力爐開發Team 前任研究員  
§§§ 正會員 : 東亞大學校 電氣工學科 副教授  
# 正會員 : 韓羅産業 理事

接受日字 : 2001年 7月 26日  
最終完了 : 2001年 10月 10日

## 2. MCP용 캔형 전동기 설계

### 2.1 캔형 전동기 출력결정

냉각재 순환펌프용 전동기의 출력을 결정하기 위해서는 펌프의 필요 유량과 수두가 우선적으로 결정되어야 한다. 펌프의 유량과 수두는 원자로에서 요구되는 특성에 따라 정해지며 수두의 결정은 냉각재 순환펌프가 가열된 냉각수를 증기발생기로 강제 순환시킬 때 펌프 내부구조물 사이로 유동되면서 생기는 수력손실 등을 계산하여 구해진다. 유량은 노심에서 가열된 냉각수가 증기발생기에서 열 교환의 방법으로 증기를 생산하는 양에 따라 결정된다. 펌프 운전시 펌프에 의해서 액체에 주어지는 동력을 수동력 (Water horse power :  $L_w$ )이라 하며 다음 식 (1)과 같다[1].

$$L_w = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{102 \times 60} \quad [kW] \quad (1)$$

여기서  $\gamma$  : 액체의 비중량 [ $kg/m^3$ ],  $H$  : 전압정 [m],  $Q$  : 송출유량 [ $m^3/min$ ]을 나타낸다.

그리고 전동기에 의해서 임펠러를 회전하는데 필요한 동력을 축동력 (Shaft horse power :  $L_s$ )이라 하며 수동력과 의 관계는 다음 식 (2)와 같다.

$$\eta_p = \frac{L_w}{L_s} \quad (2)$$

펌프의 효율과 손실은 전동기에서 발생하는 손실 ( $\eta_{Motor}$ ), 회전자의 원활한 회전을 위한 기계적인 베어링에서 발생하는 기계손실 ( $\eta_{Mechanical}$ ), 그리고 임펠러가 유체를 헤치며 회전하는데 따른 마찰손실 등을 합친 수력손실 ( $\eta_{Hydraulic}$ )로 나눌 수 있으며 이에 따른 펌프 전체손실은 다음 식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta_{total} = \eta_{Motor} \cdot \eta_{Mechanical} \cdot \eta_{Hydraulic} \quad (3)$$

기존 펌프 축동력은 전동기손실이 작기 때문에 무시하고 기계적 손실, 수력손실, 체적손실만 고려하여 계산을 한다. 하지만 MCP용 전동기는 유도전동기이며, 특히 고정자내부와 회전자표면에 얇은 캔으로 밀봉된 캔형 전동기이기 때문에 캔에서 발생하는 손실이 상당히 크며, 회전자 슬롯형태 또한 기존 전동기와는 달리 완전 개방형 형태로 제작되어 철손이 증가하게 되므로 MCP 축동력 계산 시에는 전동기에서 발생하는 손실을 반드시 고려해야 된다.

MCP용 냉각재 순환펌프에서 요구된 유량 ( $Q$ )은 922 [ $m^3/h$ ] 이고 수두 ( $H$ )는 9 [m]이며 물의 비중 ( $\gamma$ )은 1,000 [ $kg/m^3$ ]이다. 그러므로 고온 운전모드에서 필요한 수동력은 위의 식(1)을 이용하면 약 22.6 [kW]가량 요구된다. 하지만 전동기 손실, 기계적 손실, 그리고 수력학적 손실들

을 고려한 전체 예상효율 및 펌프의 여유도 등을 고려하면 전동기에서 요구되는 정격출력은 약 32 [kW]로 결정된다.

냉각재 순환펌프는 저온과 고온의 2가지 모드에서 동작한다. 원자로 냉각 시 회전수는 900 [rpm], 주파수는 15 [Hz], 출력은 0.5 [kW]이며 고온시 회전수는 3600 [rpm], 주파수는 약 61.5 [Hz], 출력은 32 [kW]이다. 전동기의 극수는 전동기 캔에서의 와전류손실을 최소화하기 위하여 2극으로 설정하였으며 권선의 결선은 Y결선, 전동기의 효율은 0.8, 역률 0.8을 기준으로 설계를 하였다. 이상의 설계사양을 다음 표1에 나타내었다.

표 1 냉각재 순환펌프용 전동기 설계사양

Table 1 Design specification of motor for the MCP

		설계사양
저온시 [20℃]	출력	0.5 [kW]
	주파수	15 [Hz]
	회전수	900 [rpm]
고온시 [300℃]	출력	32 [kW]
	주파수	61.5 [Hz]
	회전수	3,600 [rpm]
전압		400 [V]
상수		3 상
극수		2 극
효율		0.8
역률		0.8
결선		Y-결선

### 2.2 캔의 특성과 캔형 전동기 설계

#### 2.2.1 등가회로도법을 이용한 캔 손실계산

캔형 전동기의 정확한 해석을 위하여 전동기의 기본적인 손실 값인 고정자 저항손, 회전자 저항손, 철손뿐만 아니라 캔에서 발생하는 와전류 손실을 정확히 계산해야 한다. 그러므로 본 논문에서는 다음 그림 2와 같은 변형된 T형 등가회로도법을 제안하여 캔형 전동기의 캔 손실을 계산하는 방법을 제시하였다. 고정자 캔의 경우 정지하고 있는 회전자와 같이 취급이 가능하므로 그림 2와 같이 자화 리액턴스와 병렬로 구성을 하였으며, 회전자 캔의 경우 회전자 캔에서 발생하는 와전류는 고정자에서 발생하는 회전자계의 슬립(slip)주파수에 비례하며 슬립 값은 보통 정격점에서 약 0.03 정도가 되며 이 때의 회전자 캔 손실 값은 고정자 캔 손실 값의 약 0.1 [%]이하에 불과하므로 회전자 캔 손실 값을 무시하고 여기서는 고정자 캔 손실만을 고려한다.

캔 저항을 아래 그림 2와 같은 등가 회로도로 나타내기 위하여 1차측으로 환산되어야 하며 이를 실행하기 위한 절차는 다음과 같다.

- (1) 캔 바(Bar)의 저항손실은 캔 바 전류와 저항에 의해 구해진다.
- (2) 캔 링(Ring)에 흐르는 전류는 1/2극 간격내 들어 있는 캔 바 전류를 합함으로서 계산된다.

- (3) 캔 링 손실은 캔 링 전류와 전류에 의해 구해진다.
- (4) 캔 저항손은 캔 링 손실과, 캔 바 손실로 구성되며 캔 바에 흐르는 전류에 의해 표시될 수 있다.
- (5) 캔 기자력이 캔 바 전류에 의해 표시되고 캔 바 전류와 상관관계가 있는 고정자 전류에 의해 표시된 고정자 기자력 파형과 같다.
- (6) 전체 캔 손실이 고정자 전류에 의해 표시된다.

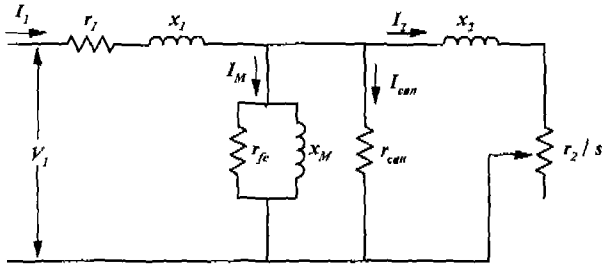


그림 2 캔손실이 고려된 T형 등가회로도  
Fig. 2 T-type equivalent circuit considering can loss

그림 2에서  $V_1$  : 단자전압,  $I_1$  : 1차측 전류,  $r_1$  : 1차측 저항,  $x_1$  : 1차측 누설 리액턴스,  $I_M$  : 여자전류,  $r_{fe}$  : 철손저항,  $x_M$  : 여자 리액턴스,  $I_{can}$  : 캔 전류,  $r_{can}$  : 캔 저항,  $I_2$  : 2차측 전류,  $x_2$  : 2차측 리액턴스,  $r_2$  : 2차측 저항,  $s$  : 슬립을 나타낸다.

2.2.2 캔 바 도체손실

유도기의 회전기자력은 공간기본파와 고조파의 합으로 구성되어 있지만 여기서는 기본파의 영향만을 고려하기로 한다. 기본파 자속이 슬립주파수에서 캔 도체를 쇄교함에 따라 도체 각각에 전기각만큼의 위상차가 있는 정현파 전압을 유도한다. 캔 바와 캔 링에 흐르는 전류흐름도를 다음 그림 3에 나타내었으며 그림에서 모든 캔 바의 전류는 캔 링을 통하여 되돌아간다. 이 그림에서 캔 바의 전류가 최대인 지점을 0도로 설정하였으며 연속 전류 값은  $I_{canb} \cos \theta$  로  $\theta$  는 0도에서 캔 바의 각 변위이다. 전체 캔 바에서 손실은 다음 식과 같다.

$$\left(\frac{I_{canb}}{\sqrt{2}}\right)^2 \frac{\rho_{can} L_{canbar}}{A_{canbar}} = I_{canb}^2 \frac{\rho_{can} L_{canbar}}{2A_{canbar}} \quad (4)$$

여기서  $A_{canbar}$  : 단일 캔 바의 단면적,  $L_{canbar}$  : 캔 바 부분길이,  $\rho_{can}$  : 캔 바의 저항률을 나타낸다.

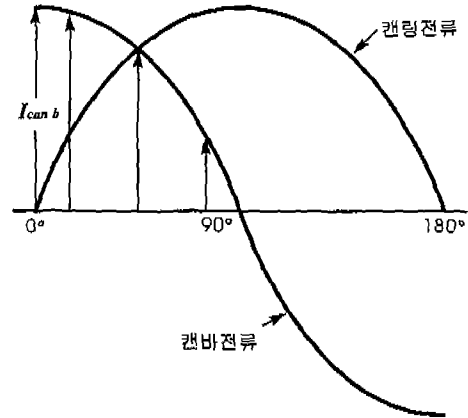
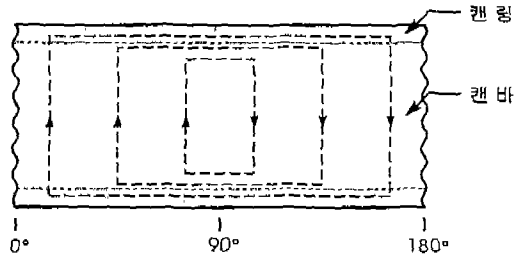


그림 3 캔 전류특성  
Fig. 3 Current characteristics of can

2.2.3 캔 링 저항손

캔 링에 흐르는 최대 전류값은 그림 3에서와 같이 90° 지점에 흐르는 전류값이며 이 지점에서 전류값은 0°에서 90°까지 즉 극간격의 1/2을 따라 흐르는 캔 바 전체 평균 전류의 합이 되므로 다음 식 (5)와 같이 되며 두 개의 캔 링의 저항 손실은 다음 식 (6)과 같게된다.

$$I_{canr} = \frac{2}{\pi} \frac{I_{canb}}{2} = \frac{I_{canb}}{\pi} \quad [A] \quad (5)$$

$$W_{canring} = \left(\frac{I_{canb}}{\sqrt{2}\pi}\right)^2 \frac{\rho_{can} \pi D_r}{A_{canring}} \times 2 = I_{canb}^2 \frac{\rho_{can} D_r}{\pi A_{canring}} \quad (6)$$

여기서  $D_r$  : 캔 링의 평균지름,  $A_{canring}$  : 캔 링 단면적을 나타낸다.

2.2.4 1차 항으로 환산된 캔 저항

상당 전체 캔 저항손은 캔 바 도체손과 두개의 캔 링 손실을 합하여 상수인  $m$ 으로 나눈 것으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_{can} = \frac{I_{canb}^2}{m} \left( \frac{\rho_{can} L_{canbar}}{2A_{canbar}} + \frac{\rho_{can} D_r}{\pi A_{canring}} \right) \quad (7)$$

캔부분의 기자력에 상응하는 전류가 1차측에 흐르고 이를  $I_{1can}$ 이라 하면  $I_{canb}$ 를  $I_{1can}$ 항으로 대체하는 방법은 다음과 같다. 기자력파가 정현파이고 식(5)와 같이 1/2 극간격의 바 전류의 합과 같은 값을 가지고 있으면 캔 전류와 이에 상호작용을 하는 고정자 Ampere-turns의 상관관계는 다음 그림 4 Vector Diagram의  $\sqrt{2} I_{1can}$ 에 고정자 권선 유효 turn인  $m C k_w$ 를 곱하여 얻을 수 있으며 이를 다음 식 (8)에 나타내었다.

$$I_{canb} = m\sqrt{2} C k_w I_{1can} \quad (8)$$

여기서  $C$ : 직렬도체수,  $k_w$ : 권선계수를 나타낸다.

식 (8)을 위의 식 (7)에  $I_b$ 로 치환하면 상당 캔 손실과 캔 저항을 다음식 (9)와 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$W_{can} = m(C k_w)^2 \left( \frac{\rho_{can} L_{canbar}}{A_{canbar}} + \frac{2\rho_{can} D_r}{\pi A_{canring}} \right) I_{1can}^2 = I_{1can}^2 r_{can} \quad (9)$$

$$r_{can} = m(C k_w)^2 \left( \frac{\rho_{can} L_{canbar}}{A_{canbar}} + \frac{2\rho_{can} D_r}{\pi A_{canring}} \right) \quad (10)$$

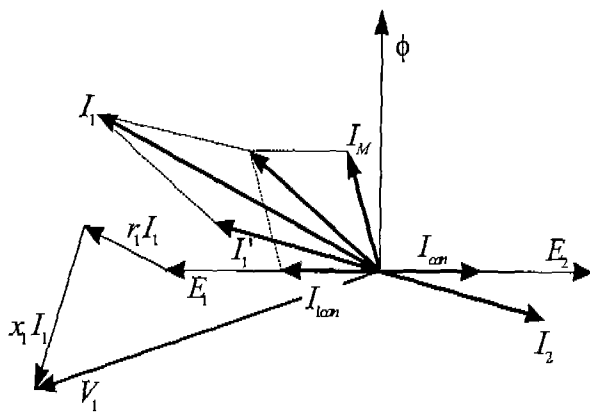


그림 4 캔형 전동기 vector diagram  
Fig. 4 Vector diagram of canned-motor

그림 4에서  $E_1(=E_2)$ : 1차 유도기전력,  $\phi$ : 매극자속,  $I_1'(=I_2)$ : 2차측 전류의 1차 환산값,  $I_{1can}(=I_{can})$ : 캔 전류의 1차 환산값을 나타낸다.

위의 상당 캔 저항을 다음 식(11)~(13)과 같이 캔 바 부분과 캔 링 부분으로 나눌 수 있으며 캔손실은 위의 그림 2의 등가회로도에서 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$r_{can} = r_{canbar} + r_{canring} \quad (11)$$

$$r_{canbar} = m(C k_w)^2 \left( \frac{\rho_{can} L_{canbar}}{A_{canbar}} \right) = m(C k_w)^2 \left( \frac{\rho_{can} L_{canbar}}{\pi \times D_1 \times Cant} \right) [\Omega] \quad (12)$$

$$r_{canring} = m(C k_w)^2 \left( \frac{0.637 \rho_{can} D_r}{A_{canring}} \right) = m(C k_w)^2 \left( \frac{0.637 \rho_{can} D_r}{(Canl - L_{canbar}) \times Cant} \right) [\Omega] \quad (13)$$

$$W_{can} = \frac{m V_1^2}{r_{can}} [kW] \quad (14)$$

여기서  $D_1$ : 고정자 내경,  $Canl$ : 캔 길이,  $Cant$ : 캔 두께,  $V_1$ : 단자전압을 나타낸다.

### 2.2.5 캔 손실을 고려한 전동기 설계

캔형 전동기를 설계하는데 있어 캔의 손실은 전동기의 효율을 감소시키기 때문에 효율상승을 위하여 캔의 손실을 최소화하는 방법을 찾아야 한다. 캔의 손실을 최소화하기 위한 방법은 위에서 정의한 식 (11)~(14)에서 간단히 얻을 수 있다. 위의 식 (14)에서 고정자 단자전압은 일정하므로 캔에서 발생하는 손실을 줄이려면 캔의 저항을 증가시키면 캔 손실이 감소된다. 실제 Can 손실에 가장 영향을 많이 주는 부분은 캔 링 부분보다는 캔 바 부분이므로 식(12)의  $r_{canbar}$ 를 중심으로 분석해 보면 대체로 아래와 같은 5가지 방법으로 캔 저항을 증가시켜 캔 손실을 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

- ① 저항율이 높은 재질을 캔재질로 사용할 것
- ② 캔 두께를 최소화 할 것
- ③ 고정자 직경을 최소화 할 것
- ④ 고정자 길이를 최대한 증가시킬 것
- ⑤ 고정자 직렬 도체수를 증가시킬 것

캔형 전동기의 특성은 일반적인 전동기에는 없는 캔의 손실이 출력에 비하여 약 7~15 [%]정도를 차지하기 때문에 캔이 없는 일반 산업용 전동기와는 상당히 다른 특성을 나타낸다. 이러한 캔의 손실을 최소화 하기 위하여 본 논문에서는 캔의 재질로 저항율이 상당히 크고 (도전율: 순수 구리대비 2.0 [%]), 회전자 내부의 높은 압력에 견딜 수 있는 비자성 Stainless재질로 선택하였으며 캔 두께는 내부 압력에 견딜 수 있는 두께인 0.6 [mm]로 설계를 하였다.

캔 손실을 최소화하기 위하여 고정자의 직경과 길이 설계인 체적결정 역시 신중히 결정해야 한다. 캔형 전동기 체적 결정은 다음의 식(15)~(18)을 이용하였다[2].

$$D_1^2 L_1 = C_o \frac{P_o}{n_o} \quad (15)$$

$$C_o = \frac{5.79 \times 10^7}{B_g \times ac \times \eta \times \cos \phi} \quad (16)$$

$$D_1 = \sqrt[3]{(D_1^2 \cdot L_1) \frac{p}{\pi \gamma}} \quad (17)$$

$$\gamma = \frac{L_1}{\tau} \quad (18)$$

여기서  $P_o$  : 전동기 출력,  $n_o$  : 전동기 정격회전수,  $B_g$  : 자기장하,  $ac$  : 전기장하,  $\eta$  : 전동기 효율,  $\cos \phi$  : 전동기 역률,  $D_1$  : 고정자 내경,  $L_1$  : 고정자 길이,  $p$  : 전동기 극수,  $\tau$  : 극간격을 나타낸다.

극간격당 길이의 비인 식(18)은 전동기의 체적을 결정하는 중요한 요소 중의 하나로서 일반적인 산업용 전동기의 경우 대체적으로 0.6 ~ 2.0에서 결정이 된다. 하지만 MCP용 캔형 전동기의 경우 전동기의 효율을 올리고 캔의 손실을 저감하기 위하여  $\gamma > 2.0$ 이상의 값으로 설정해야한다. 하지만 이  $\gamma$ 값이 증가함에 따라 전동기의 중량이 증가하게 되어 전동기의 출력밀도가 나빠지게 되므로  $\gamma$ 값을 증가시킬 때는 신중을 기하여 결정해야 한다. 캔 전동기의 체적은 직경이 작고 길이가 긴 형태의 전동기로 설계가 되어야 캔 손실을 최소화 할 수 있지만 펌프에 결합되기 때문에 기계적인 원심력 및 고유진동수등 전체적인 시스템도 함께 고려가 되어야 한다. 그러므로 길이도 어느 정도 제한이 되기 때문에 본 논문에서는 회전자 치부분의 자속밀도가 포화되지 않은 값 범위 내에서 최소한의 고정자 내경을 결정하고 이를 바탕으로 고정자 길이를 결정하여  $\gamma$ 값을 2.5로 설계하였다.

공극의 길이도 전동기의 특성을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. MCP용 캔형 전동기의 공극은 베어링의 윤활과 캔을 냉각시키기 위한 물의 통로이므로 진동, 자기적 소음, 냉각통로, 역률 등의 특성을 고려하여 기계적 공극을 1.4 [mm]로 결정을 하였다.

이상과 같이 설계된 MCP용 캔형 전동기의 설계결과를 다음 표 2에 나타내었다.

표 2 MCP용 캔형 전동기 설계결과

Table 2 Design result of canned-motor for the MCP

	항 목	단위	치수
고정자	외 경	[mm]	240
	내 경	[mm]	110
	길 이	[mm]	430
	슬롯수		24
회전자	외 경	[mm]	105
	슬롯수		28
캔두께	고정자	[mm]	0.6
	회전자	[mm]	0.5
공극	기계적 공극	[mm]	1.4
	유효 공극	[mm]	2.5

### 3. MCP용 캔형 전동기 해석

일반적으로 전동기 설계의 타당성을 검증하기 위하여 등가회로도법과 유한요소법이 사용되고 있으며 본 논문에서도 등가회로도법과 유한요소법을 이용하여 전동기의 특성을 검증하였다.

#### 3.1 등가회로도 해석

등가회로해석의 흐름도를 다음 그림 5에 나타내었으며 전동기의 정확한 효율을 위하여 위에서 계산된 캔의 손실 값을 고려하여 전동기의 특성을 검증하였고 Simulation 결과 값들은 다음 표 3, 그림 6, 7에 나타내었다[3, 4, 5, 6]. 표3은 고정자 권선의 온도가 100 [°C]일 경우 특성 값을 나타낸 것이며, 여기서 Carter 계수가 1.3으로 높은 것은 전동기 내부의 높은 압력과 내부 캔 및 회전자 제작상의 어려움 등으로 회전자의 슬롯을 완전 개방형으로 설계, 제작하여 실제 유효공극은 크기 때문에 나타난 값으로, 전동기 역률 악화의 직접적인 원인이 되었다. 전동기의 효율은 약 81.0 [%], 역률은 약 85.0 [%]로 나타났다. 전동기 손실은 고정자 동손, 회전자 동손, 철손, 캔 손실, 마찰 및 풍손, 표류부하손으로 나눌 수 있는데 이들 중 가장 큰 손실은 캔의 손실로 약 4.1 [kW]로 정격출력의 약 12.8 [%], 전체 손실의 약 54 [%]를 차지하고 있어 전동기의 효율을 향상시키기 위하여 캔의 손실을 최소화해야 함을 알 수가 있다. 그림 6은 해석된 전동기 Torque 특성곡선을, 그림 7은 효율 및 역률 특성곡선을 나타낸 그림이다.

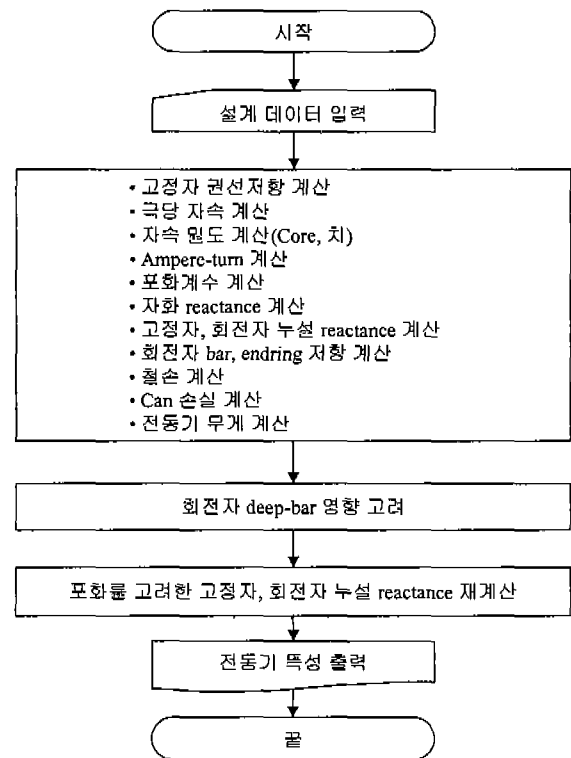


그림 5 해석 알고리즘

Fig. 5 Algorithm of analysis

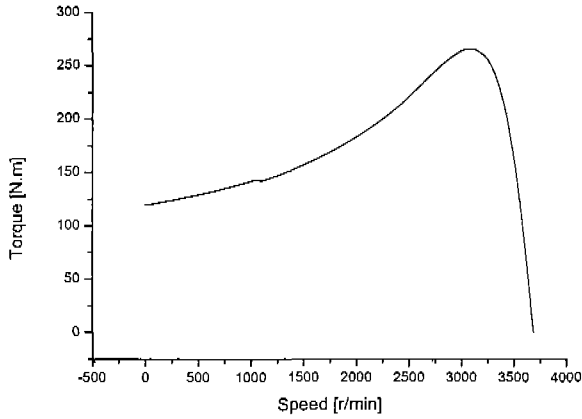


그림 6 Torque 특성곡선  
Fig. 6 Characteristics of torque

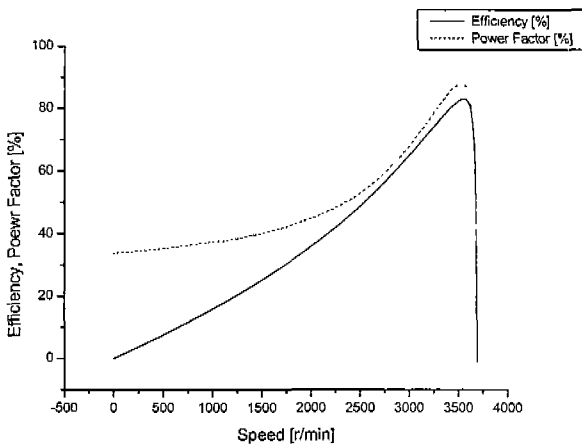


그림 7 효율 및 역률 특성곡선  
Fig. 7 Characteristics of efficiency and power factor

표3 캔형 전동기 해석결과

Table 3 Result of analysis of canned-motor

항 목	단 위	해석결과값	
Slip	[%]	2.4	
R.P.M		3,600	
주파수	[Hz]	61.5	
출 력	[kW]	32.0	
Torque	[N·m]	85.0	
입 력	[kW]	39.6	
정격전류	[A]	67.0	
효율	[%]	81.0	
역률	[%]	85.0	
Carter 계수			
		1.3	
손실	고정자 권선	[kW]	1.25
	회전자 권선	[kW]	0.82
	철심	[kW]	0.58
	캔	[kW]	4.1
	마찰 및 풍손	[kW]	0.2
	표류부하손	[kW]	0.65
	총	[kW]	7.6

### 3.2 유한요소해석

전동기의 정확한 특성해석을 위하여 3차원 유한요소해석이 필요하지만 동적 와전류 해석을 하는데 있어 현재까지 많은 문제점이 있기 때문에 유도전동기를 해석하는데 3차원 유한요소법의 활용은 거의 없는 실정이다. 반면에 2차원 유한요소 해석은 고정자와 회전자 권선의 끝단부분의 해석이 불가능하다. 하지만 권선 끝단부분의 영향을 고려하여 해석하면 보다 정확한 결과를 얻을 수가 있다. 본 논문에서 사용된 유한요소 해석 프로그램은 Maxwell(Version 1.9.04)로 권선 끝단 부분의 영향을 간이적 방법으로 처리하여 특성해석을 하였으며, 특성해석 결과들을 다음 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

해석모델이 대형이므로 계산시간의 절약을 위하여 전 모델의 1/2로 해석을 하였으며 고정자 철심은 S12를 사용하였으며, 회전자의 재질은 도전율이  $1.1 \times 10^6$  [ $\sigma/m$ ]인 스테인레스를 사용하였고 회전자 바는 도전율이  $5.8 \times 10^7$  [ $\sigma/m$ ]의 동을 사용하였다. 그림 8은 자속선도를 나타낸 그림으로 2극기의 반이 잘 나타나고 있으며 운전으로 인하여 회전자 파형이 고정자 쪽으로 따라가고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 전동기 공극자속밀도를 나타낸 그림으로 평균 공극자속밀도가 약 0.45[T]로 나타났다.

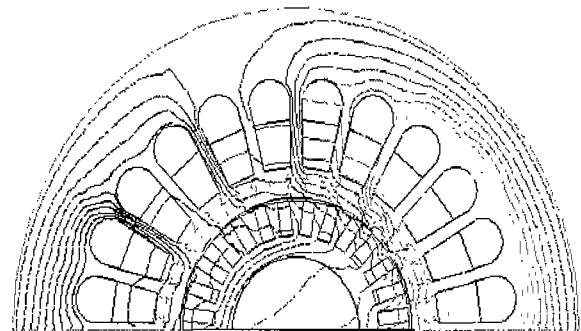


그림 8 자속선도  
Fig. 8 Equivalent flux line

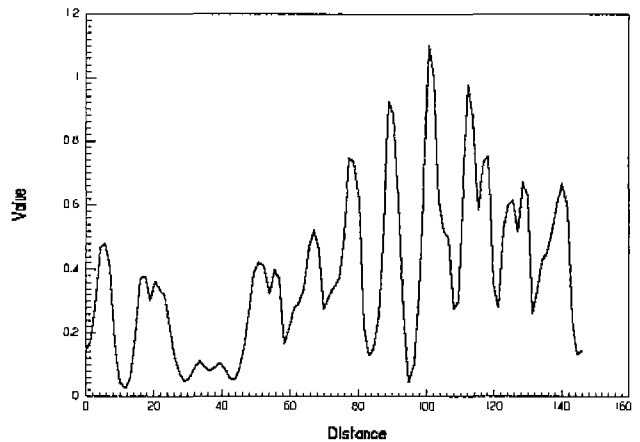


그림 9 공극 자속밀도  
Fig. 9 Air gap flux density

#### 4. MCP용 캔형 전동기 제작

캔형 전동기의 구조는 내부 냉각시스템과 열교환을 위한 외부냉각 시스템의 이중구조로 제작이 되었으며, 실제 MCP는 수직으로 설치가 되지만 전동기의 특성시험을 위하여 전동기 구조를 수평으로 제작하였다.

##### 4.1 고정자 구조

캔형 전동기의 고정자 재질로 사용된 철심은 0.5 [mm] 두께의 S12를 사용하였으며 철심크기와 두 개의 같은 링을 이용하여 고정자 철심을 고정하였다. 그림 10은 제작 완성된 고정자 철심을 나타내었다.

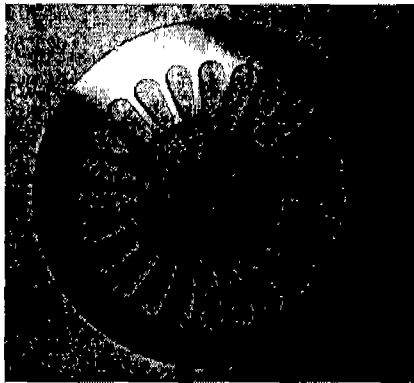


그림 10 고정자 철심  
Fig. 10 Stator core

##### 4.2 회전자 구조

캔형 전동기의 회전자구조는 원자로 내부의 높은 압력을 견디기 위하여 회전자 Yoke와 축이 일체형인 Solid-type으로 스테인레스 재질을 사용하였다. 회전자 역시 고정자와 마찬가지로 캔으로 용접이 되었으며 두 개 링 형태의 Bracket을 이용하여 회전자 엔드링과 캔을 고정하였다. 그림 11은 제작 완성된 회전자 철심을 나타내었다.

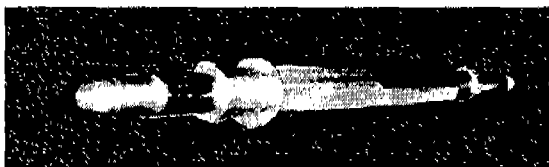


그림 11 회전자 시작품  
Fig. 11 Prototype rotor

##### 4.3 시작품 제작

그림 12는 캔형 전동기의 시작품을 나타낸 그림으로 공극의 냉각수 온도와 내부압력을 측정하기 위하여 온도계와 압력기를 설치하였다.

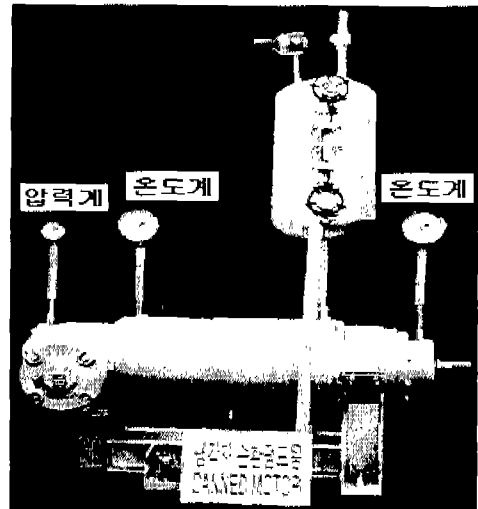


그림 12 캔형 전동기 시작품  
Fig. 12 Prototype of canned-motor

#### 5. MCP용 캔형 전동기 특성시험

전동기 특성시험은 무부하 시험, 정격부하시험, 온도특성시험을 실시하였다. 시험장비는 그림 13의 62[kW] AC Dynamo System를 이용하였으며 토크센서는 Accuracy 0.1 [%] HBM제품을 사용하였다. 전력분석기는 인버터 고조파 해석이 가능한 Norma D6000제품과 YEW PZ4000을 사용하였으며 각 제품 전압 전류 Accuracy는 45 [Hz]에서 1 [kHz]까지  $\pm 0.1$  [%]이하이다. 전력분석기용 C.T로는 Norma D6000용으로 Accuracy 0.1 [%] Norma전용 LEM제품과 YEW PZ4000용으로 Accuracy 0.2 [%] YEW 제품을 이용하였다.

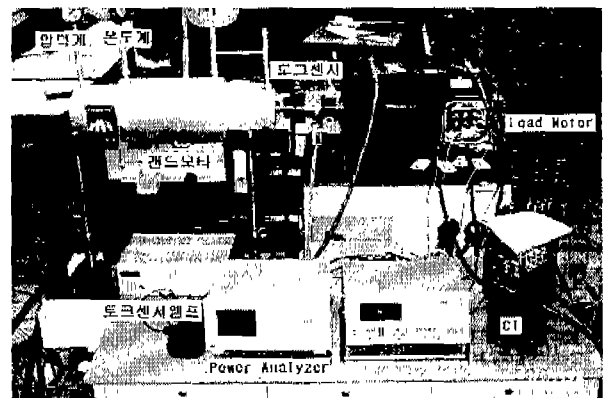


그림 13 AC dynamo system  
Fig. 13 AC dynamo system

저항측정은 기본적 Accuracy 0.5 [%] 휘스톤브릿지 방식의 장비를 사용하였다. 측정 실험값과 Simulation은 다음 표 4에 나타내었으며 측정시 대기 온도는 약 25 [°C]였다. 저항 측정결과와 Simulation 오차는 권선의 Lead선 연결을 위하여 저항율이 큰 용접재질을 이용한 용접과 Simulation 오차로 인하여 발생한 것으로 추정이 된다.

표 4 고정자 저항 특성값

Table 4 Characteristics of resistor of stator winding

항 목	실험값	Simulation	
선간저항	R-S	0.157 [ $\Omega$ ]	0.146 [ $\Omega$ ]
	S-T	0.157 [ $\Omega$ ]	
	T-R	0.157 [ $\Omega$ ]	
상저항	R	0.08 [ $\Omega$ ]	0.073 [ $\Omega$ ]
	S	0.08 [ $\Omega$ ]	
	T	0.08 [ $\Omega$ ]	

5.1 무부하 특성시험

무부하 특성시험은 정현파와 인버터를 이용하여 무부하 손실값을 구한 다음 Simulation과 특성을 비교하였다. 정격 부하에서 항상 3,600 [rpm]을 유지해야 하므로 인버터의 출력 주파수는 61.5 [Hz], 기본과 출력전압은 약 400 [V]로 설정을 하였다. 정현파의 경우 주파수는 60 [Hz]이며 입력 전압은 400[V]이므로 인버터 특성시험과 자속에서 미세한 차이는 있지만 특성검토에는 큰 영향을 미치지 못하기 때문에 무시하였다. 설계된 캔형 전동기의 경우 수직용 펌프로 사용되며 앞에서 전동기 출력을 결정할 때 펌프의 베어링 손실이 고려되었기 때문에 전동기 베어링 손실은 고려할 필요가 없다. 하지만 전동기의 특성시험을 위하여 베어링 설치가 필요하며 시험용으로 사용된 베어링은 특수 제작된 카본베어링으로 베어링 내부로 물이 흘러 들어가 윤활과 냉각을 동시에 한 후 전동기 공급사이로 흐르게 된다. 이 베어링의 내경이 직접 축과 접촉하고 있어 일반적인 베어링과 달리 마찰이 심하여 베어링 손실이 크게 발생하므로 정확한 전동기 특성 파악을 위하여 베어링 손실을 정확히 측정해야 한다. 베어링 손실은 그림 13의 AC Dynamo System의 Load Motor로 시험용 전동기를 역으로 구동하여 베어링손실을 측정하였으며 속도에 따른 캔형 전동기의 베어링 손실은 다음 표 5에 나타내었다. 표 5의 베어링 손실 값들은 캔형 전동기 내부 냉각수의 끓는점을 올리기 위하여 전동기 내부압력을 4.5 [kgf/cm<sup>2</sup>]를 인가한 후의 값들이며 전동기 내부 압력을 인가하지 않을 경우 베어링 손실은 약 2.2 [kW](6[N·m]/3,600[rpm])으로 나타나 압력 인가에 따라 증가한 베어링 손실은 약 1.3[kW]임을 알 수가 있다.

표 5 속도에 따른 베어링 손실

Table 5 Bearing loss according to speed

rpm	Torque [N·m]	손실 [kW]
3,500	9.1	3.4
3,600	9.2	3.5
3,700	9.3	3.6

무부하 특성 시험결과와 Simulation 특성비교치를 다음 표6에 나타내었다. 표 6의 Simulation ①은 60 [Hz]에서 풍손과 마찰손을 0.19 [kW]로, Simulation ②은 60 [Hz]에서 풍손과 마찰손을 실험치와 같은 3.5 [kW]로, Simulation ③은 61.5 [Hz]에서 풍손과 마찰손을 실험치와 같은 3.6 [kW]로 계산하였다.

이 표에서 알 수 있는 바와 같이 정현파 특성치와 Simulation ①에서 베어링 손실을 제외한 전기적 손실에서 오차는 약 1.1 [kW]로 나타났으며 이는 표류부하손으로 처리할 수 있다.

인버터특성시험은 인버터 입력전압이 440 [V]일 경우 전동기의 정격부하를 인가하면 인버터 출력전압은 고조파 성분을 제외한 기본과 출력전압이 약 400 [V]이며 이 상태에서 무부하 시험을 하면 표 6과 같이 고조파 출력전압은 약 472 [V], 기본과 출력전압은 약 413 [V]로 나타났다. 인버터 무부하 시험에서 무부하 입력은 약 10.3 [kW]며 베어링 손실 3.6 [kW]를 제외한 전기적 손실은 약 6.7 [kW]로 나타났다. 정현파시험과 인버터 시험에서 전기적 손실의 차이는 약 0.7 [kW]이며 이는 인버터 고조파에 의한 손실로 판단할 수 있다.

표 6 캔형 전동기 무부하 시험특성

Table 6 Characteristics of no load test of canned-motor

항 목	실험과	입력 [kW]	전압 [V]	전류 [A]	P.F [%]	회전수 [rpm]	주파수 [Hz]	손실 [kW]		
								전기	베어링	
실험값	정현파	Norma D6000	9.5	399	42.5	32.4	3,589	60	6	3.5
		YEW PZ4000	9.53	399	42.4	32.6	3,589	60	6.03	3.5
	인버터	Norma D6000	10.3	472	42.5	32.4	3,705	61.5	6.7	3.6
		YEW PZ4000	10.04	468	43	28.5	3,705	61.5	6.45	3.6
Simulation	①	5.1	400	31	24.7	3,599	60	4.91	0.19	
	②	8.47	400	32	39.1	3,591	60	4.97	3.5	
	③	8.57	400	31	37.7	3,681	61.5	4.97	3.6	

표 7은 캔형 전동기 무부하 손실특성을 표 6의 Simulation②와 실험값을 비교한 것이다.

정현파 실험에서 전체 손실은 약 9.5 [kW]이며 손실측정을 정확히 알 수 있는 풍손과 마찰손은 약 3.5 [kW], 전기적 손실은 Simulation②에서 유추하면 약 4.97 [kW]이므로 표류부하손은 약 1.03 [kW]임을 알 수가 있다. 그러므로 이상의 실험에서 캔 손실은 약 4.1 [kW]로 베어링 손실을 제외한 전체 손실의 68.3 [%]를 차지하고 있어 전동기 손실의 대부분을 차지하고 있음을 알 수가 있다. 인버터 시험의 경우 역시 표류부하손을 일정하다고 가정하면 인버터의 전기적 손실은 약 6.7 [kW]가 되어 정현파 시험과 비교하여 고조파 손실증가는 약 0.7 [kW]임을 알 수가 있다.

표 7 캔형 전동기 무부하 손실특성

Table 7 Characteristics of no load loss of canned-motor

항 목	Simulation ②		실험값	
	3591 [rpm]	3681 [rpm]	정현파 [3589rpm]	인버터 [3705rpm]
고정자 권선저항손[kW]	0.27	0.27	6.0	6.7
회전자 권선저항손[kW]	0	0		
철손 [kW]	0.6	0.6		
캔 저항손 [kW]	4.1	4.1	3.5	3.6
표류부하손 [kW]	-	-		
마찰 및 풍손 [kW]	3.5	3.6		
총 손실[kW]	8.47	8.57	9.5	10.3



5.2 부하 특성시험

부하 특성시험 역시 무부하 시험과 마찬가지로 정현파와 인버터를 이용한 시험값과 Simulation 특성치와 비교, 정리하여 다음 표 8에 나타내었다. 정현파 시험은 전동기 입력 전압과 주파수를 400 [V] / 60 [Hz]로 시험을 하였으며 인버터의 경우 정격부하에서 항상 3600 [rpm]을 유지해야 하므로 인버터의 출력 주파수는 61.5 [Hz], 인버터 입력전압은 440 [V]로 특성시험을 하였다.

Simulation과 정현파시험을 비교하기 위하여 Simulation ①은 입력주파수 60 [Hz], 풍손과 마찰손은 0.19 [kW], 정격부하시의 회전수는 3,500 [rpm]으로 Simulation하였으며, Simulation ②는 입력주파수는 60.0 [Hz], 풍손과 마찰손은 3.5 [kW], 정격부하시 회전수는 3,500 [rpm]으로 Simulation하였고, Simulation과 인버터 시험을 비교하기 위하여 Simulation ③은 입력주파수는 60.0 [Hz], 풍손과 마찰손은 3.6 [kW], 정격부하시 회전수는 3,590 [rpm]으로 Simulation 하였다.

5.2.1 정현파 특성시험과 Simulation특성 비교

Simulation ②와 정현파 특성시험을 비교하면 다음과 같다. Simulation ② 역시 정현파 시험과 마찬가지로 전동기 입력전압과 주파수를 400 [V] / 60 [Hz]로 하였으며 베어링 손실을 고려한 효율값은 74.5 [%], 베어링 손실을 제외하면 80.8 [%]로 나타났다. 정현파 시험결과 베어링 손실을 고려하면 효율이 73.2[%], 베어링 손실을 제외하면 79.4 [%]로 나타나 베어링 손실을 고려하면 1.3 [%], 베어링 손실을 제외하면 약 1.4 [%]의 오차를 나타내었다.

역률의 경우 Simulation ②에서 알 수 있듯이 약 85.8 [%], 정현파 시험의 경우 약 76.9 [%]로 나타나 약 8.9 [%]의 오차가 발생을 하였다. 전류의 경우 Simulation ②에서는 약 72.3 [A], 정현파 시험의 경우 약 81.1 [A]로 나타나 약 8.8 [A]의 오차를 보였으며 이는 역률의 영향으로 인하여 발생한 것으로 추정된다.

5.2.2 인버터 특성시험과 Simulation특성 비교

Simulation ③과 인버터 특성시험을 비교하면 다음과 같다. Simulation ③은 전동기 입력전압과 주파수를 400 [V]/61.5[Hz]로 하였으며 베어링 손실 고려시 효율은 74.4 [%], 베어링 손실 제외시 80.8 [%]로 나타나 Simulation ②와 차이가 없었다. 인버터 시험결과 베어링 손실 고려시 효율은 72.7 [%], 베어링 손실 제외시 78.8 [%]로 나타나 베어링 손실을 고려하면 1.7 [%], 베어링 손실을 제외하면 약 2.0 [%]의 오차를 나타내었다.

인버터 시험의 경우 정현파 시험과 비교해 볼 때 효율은 베어링 손실 고려시 72.7 [%](0.5%감소), 베어링 손실 제외시 78.8 [%](0.6%감소)로 나타나 정현파 시험시와 큰 차가 없음을 알 수 있다. 역률은 정현파 시험의 경우 76.9 [%], 인버터 시험의 경우 69.4 [%]로 나타나 약 7.5 [%] 감소가 되었으며 전류값 역시 역률 악화로 인하여 정현파 시험의 경우 81.1 [A], 인버터 시험의 경우 83.4 [A]로 나타나 약 2.3 [A]증가를 하였다.

5.2.3 부하손실 특성

표 9는 캔형 전동기 부하 손실특성을 Simulation과 실험값을 비교한 표이다. 정현파 실험에서 전체 손실은 약 11.6 [kW]이며 손실측정을 정확히 알 수 있는 풍손과 마찰손은 3.4 [kW], 전기적 손실은 Simulation②에서 유추하면 약 7.6 [kW]이므로 알지 못하는 손실인 표류부하손은 약 0.6 [kW]임을 알 수가 있다. 그러므로 부하시의 정현파 실험에서 캔 손실은 약 4.1 [kW]로 베어링 손실을 제외한 전체 손실인 8.2 [kW]의 50[%], 정격출력의 약 12.8 [%]를 차지하고 있어 일반적인 전동기와 달리 캔형 전동기의 경우 캔손실이 대단히 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다.

인버터 시험의 경우 전기적 전체손실은 약 8.6 [kW]로 나타나 정현파 시험과 비교하면 고조파 손실이 약 0.4 [kW] 증가하므로 인버터의 고조파 영향은 전동기의 특성에 그다지 큰 영향은 미치지 못하고 있음을 알 수가 있었다.

표 8 캔형 전동기 부하 특성시험

Table 8 Characteristics of load test of canned-motor

항 목	전압 [V]	전류 [A]	출력 [kW]	입력 [kW]	손실 [kW]		효율 [%]	역률 [%]	회전 수 [rpm]	주파수 [Hz]	Torque [N·m]		
					전기	베어링							
실험값	정현파	PZ 4000	400	81.5	31.6	43.2	8.2	3.4	73.2 (79.4)	76.9	3,503	60	86
		Norma D6000	400	81.1	31.6	43.2	8.2	3.4	73.2 (79.4)	76.9	3,503	60	86
	인버터	PZ 4000	443	83.2	32.3	44.56	8.76	3.5	72.5 (78.5)	69.8	3,585	61.5	86
		Norma D6000	441	83.4	32.3	44.4	8.6	3.5	72.7 (78.8)	69.4	3,585	61.5	86
Simulation	①	400	68	32	39.6	7.41	0.19	80.8	84.8	3,514	60	87	
	②	400	72.3	32	43.0	7.6	3.4	74.5 (80.8)	85.8	3,503	60	87.3	
	③	400	72.2	32	43.1	7.6	3.5	74.4 (80.8)	86.2	3,590	61.5	85	

표 9 캔형 전동기 부하 손실특성

Table 9 Characteristics of load loss of canned-motor

항 목	Simulation특성값		실험값	
	Simulation② 3,500rpm	Simulation③ 3,590rpm	정현파 [3,500rpm]	인버터 [3,600rpm]
고정자 권선저항손 [kW]	1.48	1.47	8.2	8.6
회전자 권선저항손 [kW]	1.0	1.01		
철손[kW]	0.6	0.58		
캔 저항손[kW]	4.1	4.1		
표류부하손[kW]	0.51	0.44		
마찰 및 풍손[kW]	3.4	3.5	3.4	3.5
총 손실[kW]	11.0	11.1	11.6	12.1

5.3 온도 특성시험

그림 14는 캔형 전동기 냉각수 흐름도와 Thermo-couple의 배치도를 나타낸 그림이며 그림 15는 온도특성시험을 나타낸 그림으로 횡축 1칸의 시간은 6분이며 종축 작은 칸 온도는 2 [°C]이다. 시험에 사용된 Thermo-couple은 T-type으로 고정자 Slot 밑바닥에 3개, 권선 엔드(End)부분에는 2개를 설치하였으며 측정장비는 YEW HR1300을 이용하였다.

그림 15는 표 8의 인버터 특성시험상태에서 온도시험을 계속하였다. 전동기 온도시험은 펌프 냉각수의 온도와 유량 등을 파악하여 이에 맞는 시스템을 구축해야 되지만 냉각수의 정확한 온도와 유량등이 결정되지 않아 임의적으로 냉각 시스템을 구축하여 시험을 하였다. 냉각수의 유량은 0.6 [m<sup>3</sup>/h]이며 권선 온도포화시 외부에서 주입되는 냉각수 입구의 온도는 약 26 [°C], 외부 냉각수 출구 온도는 약 37 [°C]로 나타났다.

그림 15에서 보는 바와 같이 고정자 슬롯 내부권선인 ①번은 평균온도 63 [°C], ②번은 67 [°C], ③번은 74 [°C]에서 포화가 되었으며 권선 엔드부분인 ⑤번은 평균온도 119 [°C], ④번은 127 [°C]에서 포화가 되었다. ⑥은 대기온도 26 [°C]를 나타내며 전체적으로 권선 포화온도까지 도달하는 시간은 약 60분가량 소요되었다.

이상의 실험에서 정격운전시에는 가장 온도가 올라가는 부분은 외부 냉각수 출구와 접하는 End-coil ④으로 약 127 [°C]에서 포화가 되지만 권선의 절연등급은 C등급이므로 32 [kW] 정격 운전시에는 전혀 문제가 없는 것으로 나타났다.

이상의 특성시험과 해석에서 캔을 고려한 전동기 설계와 해석에서 베어링 손실을 제외한 경우 효율특성은 Simulation과 정현파 시험과의 오차는 약 1.4 [%], 인버터 시험과의 오차는 약 2.0 [%]로 나타나 캔형 전동기 설계 및 해석에 큰 오차 없이 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 역률의 경우 정현파 실험과 Simulation 해석에서 8.9 [%]란 다소 큰 오차를 포함하고 있는데 이는 회전자가 Yoke와 Shaft가 일체형인 Solid-type의 스테인레스 재질인 관계로 이에 대한 정확한 해석이 필요하지만 현재까지 이에 대한 정밀한 해석이 되지 못한데서 발생한 오차로 판단되며 이에 대한 것은 향후의 연구과제로 남아있다.

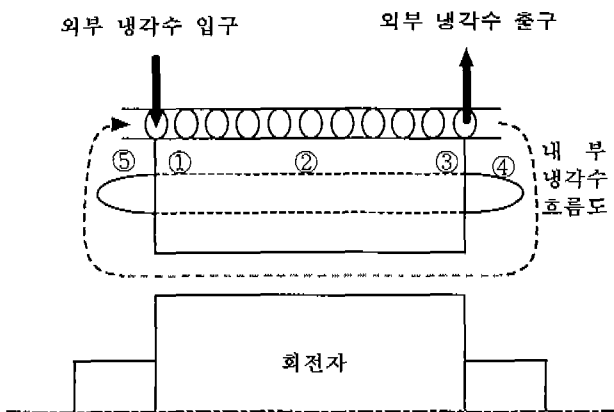


그림 14 전동기 냉각수 흐름 및 Thermo-couple 배치도  
Fig. 14 Cooling water flow of motor and setting of thermo-couple

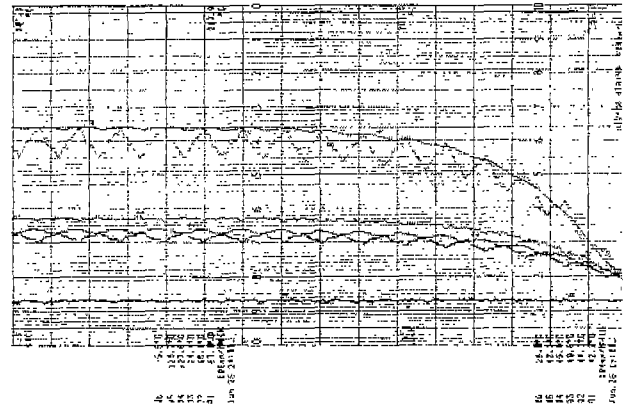


그림 15 캔형 전동기 온도특성  
Fig. 15 Characteristics of temperature of canned-motor

## 6. 결 론

본 논문에서는 순환펌프용 캔형 전동기 설계시 캔의 손실을 최소화 할 수 있는 설계방법과 캔형 전동기 해석시 캔 손실을 고려하여 정확히 해석할 수 있는 등가회로도법을 제시하였다.

Simulation 특성해석 값과 캔형 전동기 특성 실험 값을 비교해 본 결과 전동기 효율특성은 전동기의 베어링 손실을 제외한 경우 Simulation과 정현파 시험과의 오차는 약 1.4 [%], 인버터 시험과의 오차는 약 2.0 [%]로 나타나 캔형 전동기 설계 및 해석에 큰 오차 없이 사용할 수 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김영득, 김성구, 최상호, “유체기계”, 청문각, 1996
- [2] 山下善太郎, “交流機器の理論と設計”, 新思潮社, 昭和41
- [3] C. G. Veinott, “Theory and Design of Small Induction Motor”, McGraw-hill Book Company, Inc, New York, 1959.
- [4] P. L. Alger, “The Nature of Induction Machines”, Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York, 1965.
- [5] Paul L. Cochran, “Polyphase Induction Motors”, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1989.
- [6] Paul W. Franklin “Advanced Theory and Design of Rotating Electrical Machinery”, The Curator of the University of Missouri, 1976
- [7] J.H.Kuhlmann, “Design of Electrical Apparatus”, 3rd.ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950.
- [8] Charles C. Libby, B.S., M.S. in E.E., “Motor Selection and Application”, McGraw-hill Book Company, Inc., New York - Toronto - London, 1960.
- [9] Enrico Levi, “Polyphase Motors”, John Willy & Sons, 1984

저 자 소 개



**구 대 현 (具 大 鉉)**  
 1963년 9월 21일 생. 1989년 한양대 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹 선임연구원  
 Tel : 055-280-1486, Fax : 055-280-1547  
 E-mail : dhk371@keri.re.kr



**박 진 석 (朴 鎭 錫)**  
 1961년 10월 3일 생. 1984년 경북대 공과대학 기계공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1986년~현재 한국원자력연구소 선임연구원  
 Tel : 042-868-2640, Fax : 042-868-8990  
 E-mail : jspark1@nanum.kaeri.re.kr



**강 도 현 (姜 道 鉉)**  
 1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년~1989 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 박사 졸업. 1989~현재 한국전기연구원 선임연구원 (Mechatronics 연구그룹장)  
 Tel : 055-280-1480, Fax : 055-280-1547  
 E-mail : dhkang@keri.re.kr



**조 윤 현 (曹 允 鉉)**  
 1961년 12월 25일 생. 1984년 한양대 공과대학 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1986. 2~1988. 2 삼성종합기술원. 1990. 3~1995. 2 한국전기연구소. 1995년~현재 동아대 공과대 전기공학과 조교수  
 Tel : 051-200-7742, Fax : 051-200-7743  
 E-mail : yhcho@daunet.donga.ac.kr



**박 정 우 (朴 正 雨)**  
 1963년 2월 5일 생. 1986년 충남대 공과대학 전자공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2000년 경북대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년~현재 한국전기연구원 선임연구원  
 Tel : 055-280-1485, Fax : 055-280-1547  
 E-mail : jwpark@keri.re.kr



**정 군 석 (鄭 郡 錫)**  
 1959년 9월 18일 생. 1985년 동아대 전기공학과 졸업. 1997년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 1985년~한라산업(주) 상무이사 1999년~한라산업기술연구소장 역임  
 Tel : 051-261-5911, Fax : 051-261-6852  
 E-mail : hebw@netsgo.com



**김 중 인 (金 鍾 仁)**  
 1955년 3월 7일 생. 1979년 인하대 기계공과대학 졸업. 1983년 ENSM, France 졸업(석사). 1986년 ENSM, France 졸업(박사). 1986~현재 : 한국원자력연구소, 일체형원자로 주기기개발 과제책임자  
 Tel : 042-868-8646, Fax : 042-868-8990  
 E-mail : jikim@nanum.kaeri.re.kr